

Применение операционных усилителей в качестве компараторов

Печатается с разрешения фирмы Analog Devices (www.analog.com)

Джеймс Брайант (James Bryant)

Перевод Алексея Власенко

Инженер компании Analog Devices рассказывает об особенностях применения интегральных операционных усилителей в тех схемах, где они могут заменить специализированные ИС аналоговых компараторов.

ВВЕДЕНИЕ

Компаратор – это устройство с двумя входными выводами (инвертирующим и неинвертирующим) и выходом, напряжение которого, как правило, имеет размах от питания до питания (rail-to-rail). В этом он подобен операционному усилителю (см. рис. 1). Компаратор обладает низким напряжением смещения, большим коэффициентом усиления, большим коэффициентом ослабления синфазного сигнала (КОСС). Так же как и операционный усилитель.

Так в чём состоит различие? Компаратор имеет логический выход, который показывает, на каком из входов имеется более высокий потенциал. Если выход компаратора является ТТЛ- или КМОП-совместимым (а многие компараторы именно такие), подразумевается, что напряжение на выходе может быть равно одному или другому напряжению на шинах питания – или находиться в процессе быстрого перехода между ними.

Операционный усилитель (ОУ) имеет аналоговый выход, напряжение на котором обычно не приближается близко к шинам питания, а находится где-то между ними. ОУ разработан для применения в схемах с замкнутой обратной связью (ОС) между выходом и его инвертирующим входом. Однако выходные сигналы большинства современных уси-

лителей могут иметь размах, близкий к напряжениям на шинах питания. Почему бы не использовать их в качестве компараторов?

Операционные усилители обладают большим коэффициентом усиления, малым напряжением смещения и высоким КОСС. Обычно они имеют меньшее значение входного тока и стоят дешевле, чем компараторы. Кроме того, ОУ часто доступны по два или четыре прибора в одном корпусе, – если вам необходимы три ОУ и один компаратор, по-видимому, бессмысленно покупать четыре ОУ, не использовать один из них и затем покупать отдельный компаратор.

Однако лучший совет по поводу использования ОУ в качестве компаратора очень простой – не делайте этого!

Компараторы разработаны для работы в качестве систем без ОС, для управления логическими схемами и с высоким быстродействием, даже при перегрузке. ОУ не предназначены ни для одной из этих функций. Они сконструированы для работы в системах с замкнутой ОС, для управления резистивными или реактивными нагрузками и никогда не должны быть перегружены до насыщения.

Но по ряду причин заманчиво использовать операционный усилитель в качестве компаратора. В этой статье мы рассмотрим все соображения и предостережения, касающиеся возможных неожиданных последствий применения ОУ в качестве компаратора.

ЗАЧЕМ ПРИМЕНЯТЬ ОУ В КАЧЕСТВЕ КОМПАРАТОРА?

- Это удобно,
- Экономично;
- Низкий входной ток I_B ;
- Низкое напряжение смещения V_{OS} .

Итак, есть несколько причин, чтобы использовать ОУ в качестве компараторов. Некоторые из них технические, одна – чисто экономическая. ОУ производятся в виде одиночных приборов, но также по два или по четыре ОУ в одном корпусе. Сдвоенные и счетверённые приборы дешевле, чем два или четыре отдельных ОУ, и занимают на плате меньше места. Это экономично – использовать один из операционных усилителей в качестве компаратора, вместо того чтобы покупать дополнительный компаратор, но это не слишком хорошая технология проектирования.

Компараторы разрабатываются для чистого и быстрого переключения и поэтому часто имеют худшие параметры на постоянном токе, чем многие ОУ. Поэтому, возможно, ОУ подходят для использования в качестве компаратора в схемах, где требуется низкое смещение V_{OS} , низкий ток I_B и большой КОСС. Никогда не стоит применять ОУ в качестве компаратора, если важно высокое быстродействие.

ПОЧЕМУ НЕ СТОИТ ИСПОЛЬЗОВАТЬ ОУ В КАЧЕСТВЕ КОМПАРАТОРА?

- Низкое быстродействие;
- Неподходящая схемотехника входных каскадов;
- Несогласованные логические схемы;
- Устойчивость/гистерезис.

Есть несколько причин, чтобы не применять ОУ в качестве компаратора. Первая и самая главная – низкое быстродействие, но также важны уровни выходного сигнала, устойчивость (и гистерезис), а также некоторые соображения, связанные с входной схемой ОУ. Далее мы рассмотрим их более подробно.

Большинство компараторов – быстродействующие устройства, а некоторые – очень быстродействующие, как и операционные усилители. Почему мы должны ожидать низкого быстродействия, если применяем ОУ в каче-

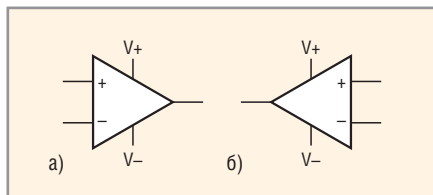


Рис. 1. Изображение ОУ и компаратора на схеме

стве компаратора? Компаратор разработан для работы при больших дифференциальных напряжениях на входе, тогда как ОУ обычно работает с замкнутой петлей ОС и его входные напряжения минимизированы за счёт отрицательной ОС. Когда ОУ перегружается (иногда для этого достаточно нескольких милливольт), некоторые из его каскадов могут войти в насыщение. Если это происходит, прибору требуется сравнительно большое время для выхода из насыщения – гораздо больше, чем если бы он не находился в насыщении (см. рис. 2).

Время выхода из насыщения, скорее всего, значительно больше, чем обычная групповая задержка (время прохождения сигнала от входа на выход), и часто зависит от степени перегрузки.

Поскольку лишь для немногих ОУ нормируется время восстановления из различающихся уровней насыщения, пользователю необходимо экспериментально определить задержки, исходя из уровней насыщения, ожидаемых в конкретной схеме. Значения, применяемые для расчётов, должны быть как минимум в два раза хуже, чем полученные в любых тестах, поскольку испытанные образцы могут быть не типичными.

Выход специализированного компаратора спроектирован для управления определённым семейством (или семействами) логических схем. Часто имеется отдельное питание для выходного каскада компаратора, чтобы обеспечить правильные логические уровни.

Современный ОУ обычно имеет выходной сигнал «от питания до питания», то есть его максимальное выходное напряжение близко к положительному напряжению источника питания, а минимальное – к отрицательному напряжению источника питания. (В старых разработках использовались схемы с резервом, превышающим 1,5 В до обеих шин питания.)

Если логическая схема и ОУ питаются от одного источника, то ОУ типа rail-to-rail может успешно работать с логикой ТТЛ или КМОП, но если ОУ и логическая схема имеют разные источники питания, понадобится дополнительная согласующая схема между ними (см. рис. 3). Отметим, что ОУ питается от источника ± 5 В и должен управлять логической схемой, которая питается от +5 В; данная логическая схема может выйти из строя, если на её вход подать -5 В.

Простейшими согласующими схемами являются инверторы. Можно реализовать инвертор на транзисторах типа n-p-n, но они потребляют ток базы. N-канальные МОП-транзисторы являются более подходящими (см. рис. 4).

Резистор R_B устанавливает ток базы транзистора, а резистор R_L устанавливает ток коллектора/стока. Чем меньше значения резисторов, тем выше быстродействие инвертора, но потребляется больше мощности. Обычно используются резисторы с номиналом в несколько килоом. N-канальный МОП-транзистор должен иметь низкое пороговое напряжение затвора (< 2 В), а напряжение пробоя затвор-исток должно превышать максимальные напряжения на выходе ОУ. Как правило, достаточно ± 25 В. Даже если ОУ и логическая схема используют разные источники питания, последние должны быть взаимосвязаны. Положительное напряжение питания ОУ, $+V_A$, должно быть на 3 В «положительнее» отрицательное напряжение питания логической схемы, $-V_L$, чтобы за счёт по меньшей мере 3 В обеспечить достаточное для открывания МОП-транзистора напряжение на затворе. Кроме того, отрицательный источник питания ОУ не должен быть «положительнее» отрицательного источника питания логической схемы, хотя может быть к нему подсоединён. Безусловно, необходимо соблюдать предельно допустимые паспортные параметры всех используемых приборов.

Комплементарный МОП-инвертор можно реализовать на n-канальном и p-канальном МОП-транзисторах (см. рис. 5). Такой каскад имеет преимущество в том, что он не потребляет

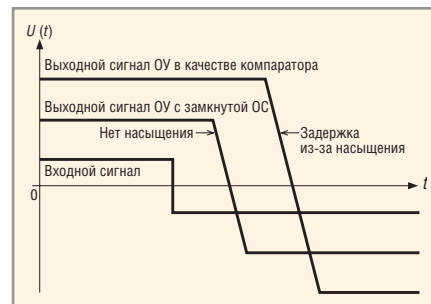


Рис. 2. Задержка переключения ОУ при насыщении

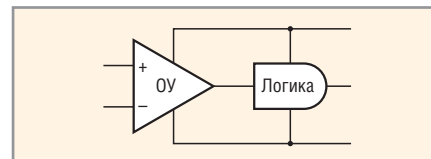


Рис. 3. Согласование ОУ с логическими элементами

ток покоя, но всё же через него проходит большой импульс тока в момент переключения, когда оба транзистора открыты в течение короткого промежутка времени.

В такой схеме положительное напряжение питания ОУ, $+V_A$, должно быть больше либо равно положительному напряжению питания логической схемы, $+V_L$. Кроме того, отрицательное напряжение питания ОУ не должно превышать отрицательного напряжения питания логической схемы, $-V_L$.

Другим способом, позволяющим обеспечить правильные уровни согласования логической схемы, является применение усилителя-ограничителя, такого как AD8036. Усилитель-ограничитель имеет положительные и отрицательные опорные входы, а его выходное напряжение ограничено – с точностью 30 мВ – опорными

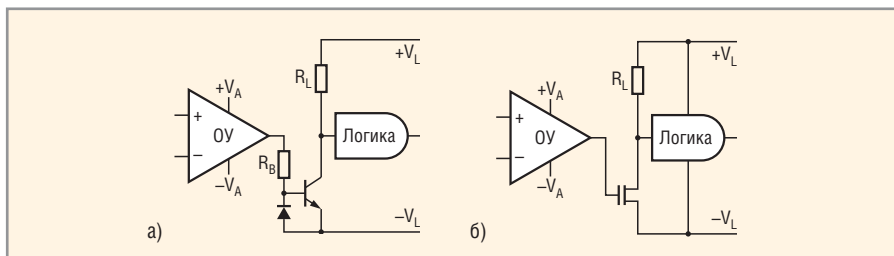


Рис. 4. Согласование ОУ с логикой с помощью а) биполярного транзистора, б) полевого транзистора

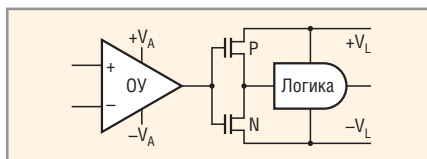


Рис. 5. Реализация комплементарного МОП-инвертора

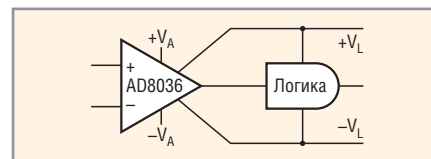


Рис. 6. Согласование усилителя-ограничителя с логикой

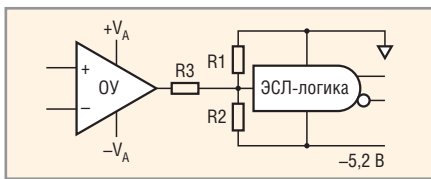


Рис. 7. Согласование ОУ с ЭСЛ-логикой

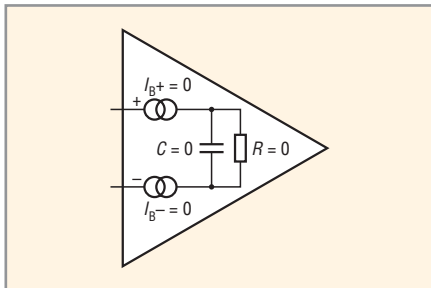


Рис. 8. Пример неверной установки входных параметров ОУ при моделировании

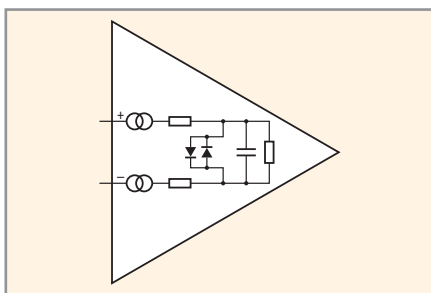


Рис. 9. Пример входной цепи некоторых ОУ

напряжениями, если оно «пытается» выйти за положительный и отрицательный пределы (см. рис. 6).

Таким образом, если положительное и отрицательное напряжения питания логической схемы подключены к опорным входам (а напряжения питания ОУ находятся за пределами напряжений питания логической схемы), выходной сигнал ОУ безопасно управляет логической схемой.

Как уже говорилось, когда ОУ используются в качестве компараторов, они, как правило, работают медленнее, чем ожидается, из-за насыщения. Поэтому вряд ли существуют многочисленные схемы, где от ОУ, используемых в качестве компараторов, требуется управление эмиттерно-связанной логикой (ЭСЛ), которая, в конце концов, используется там, где от логической схемы необходимо самое высокое быстродействие.

Однако для полноты изложения на рисунке 7 показана схема согласования, использующая всего три резистора R1, R2 и R3. Номиналы резисторов выбираются таким образом, чтобы при максимально положительном напряжении на выходе ОУ уровень напряжения на входе логического

элемента ЭСЛ составлял $-0,8$ В и $-1,6$ В при максимальном отрицательном напряжении. Эти требования обеспечиваются соотношением номиналов резисторов R1, R2 и R3; их абсолютные значения являются компромиссом между быстродействием и экономией потребляемой мощности.

Существует ряд проблем, касающихся входов ОУ, используемых в качестве компараторов. Во-первых, обычно предполагается, что входной импеданс ОУ равен бесконечности. Хотя в первом приближении это предположение справедливо для типовых ОУ, охваченных ООС по напряжению, его нельзя применить ко всему процессу разработки. Оно неверно для ОУ с токовой ООС (преобразователей импеданса), которые обладают очень низким импедансом своих инвертирующих входов. По этой причине их никогда не следует использовать в качестве компараторов.

Необходимо учитывать реальные значения входного импеданса и входного тока. Так как большинство ОУ обладают высоким входным импедансом и низким током смещения, как правило, не слишком трудно гарантировать, что схема будет работать в реальном диапазоне ожидаемых значений, отличных от нуля и бесконечности. Однако расчёты сделать необходимо. В противном случае закон Мёрфи гарантирует, что если где-то может случиться сбой, он обязательно произойдёт (см. рис. 8).

В некоторых ОУ входные каскады реализованы на паре составных биполярных или полевых транзисторов. Такие каскады обладают высоким импедансом даже при больших значениях дифференциального напряжения между инвертирующим и неинвертирующим входами. Но большинство ОУ имеют более сложное устройство входных каскадов, с дополнительными схемами компенсации входного тока или со схемами, работающими от питания до питания, которые выполнены из двух входных каскадов. Один из этих каскадов использует $n-p-n$ - или n -канальные приборы, а другой – $p-n-p$ - или p -канальные приборы, включенные параллельно, чтобы их диапазон синфазного сигнала включал оба напряжения питания.

Операционные усилители разработаны для работы с отрицательной ОС, которая минимизирует их дифференциальный входной сигнал. Упомянутые

выше сложные входные схемы могут не справиться с большими дифференциальными входными напряжениями. Мы не будем обсуждать здесь все возможные варианты входной архитектуры, однако цепь защиты, показанная на рисунке 9, является примером одной из многих подобных схем. Если дифференциальные напряжения на входе не превышают $\pm 0,6$ В, прибор имеет высокий импеданс; но свыше этого значения защитные диоды проводят ток, и входной импеданс резко снижается.

Во многих схемах применения компаратора дифференциальный входной сигнал ограничен десятками или сотнями милливольт, но в других случаях он не будет ограничен, и эти эффекты становятся существенными.

ЧИТАЙТЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Необходимо внимательно изучать документацию, чтобы выяснить, будут ли напряжения, воздействующие на схему компаратора, влиять на параметры ОУ, нарушая его нормальную работу. Эксперимент в данном случае не является хорошим советчиком, так как воздействие некоторых перегрузок по напряжению является кумулятивным, – однократное перенапряжение не приводит к существенному повреждению, но многократное перенапряжение может постепенно привести к деградации напряжения смещения, шума или разомкнутого коэффициента усиления – или всех трёх.

При изучении описания ОУ важно обратить внимание на низкие значения максимального дифференциального входного напряжения, на графики зависимости входного тока или разности входных токов от дифференциального или синфазного напряжения, которые демонстрируют значительную немонотонность или большую нелинейность, что может свидетельствовать о перевороте фазы. Для получения дополнительной информации о чтении технических материалов см. [5].

Если любые из потенциальных опасностей присутствуют, важно тщательно проанализировать поведение вашей системы, чтобы определить, нарушают ли они её нормальную работу. Можно сделать это с помощью моделирования, но имейте в виду, что Spice и другие программы не всегда правильно моделируют поведение ОУ при большом дифференци-

альном напряжении на входе. Иногда лучше произвести расчёты ожидаемых воздействий вручную, а затем выполнить некоторые эксперименты.

ПЕРЕВОРОТ ФАЗЫ

Прежние ОУ с входами на полевых транзисторах и даже некоторые ОУ с входами на биполярных транзисторах подвержены явлению, называемому переворотом, или инверсией фазы. Если входной сигнал выходит за пределы допустимого диапазона синфазных напряжений, то инвертирующий и неинвертирующий входы меняются функциями (см. рис. 10).

Как можно догадаться, это плохая новость для схемы применения компаратора. Важно быть уверенным, что ОУ, используемый в качестве компаратора, не подвержен перевороту фазы (большинство ОУ, выпускаемых в последние 10 лет, разработаны именно так), или ваша система должна быть спроектирована таким образом, чтобы сигналы на входе компаратора никогда не попадали в диапазон, где может происходить переворот фазы.

Поскольку производители ОУ не хотят привлекать внимание к перевороту фазы в своих изделиях, они предпочитают указывать в таблицах с характеристиками предел для входного синфазного напряжения без подробного описания того, что может происходить, если этот предел превышен. Имейте это в виду, и если обнаруживается, что ОУ подвержен этому эффекту, проведите его испытания.

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ

ОУ, используемый в качестве компаратора, не охвачен отрицательной ОС и, следовательно, имеет очень большой разомкнутый коэффициент усиления. Во время переходных процессов совсем небольшой вклад положительной ОС может привести к возникновению колебаний. Обратная связь может возникать из-за паразитной ёмкости между выходом и неинвертирующим входом или из-за выходных токов, проходящих по общему «земляному» проводу (см. рис. 11).

Поэтому необходимо минимизировать паразитную ёмкость посредством правильной разводки платы, а также обеспечить на неинвертирующем входе минимально возможный импеданс, чтобы ослабить любую остаточную ёмкостную ОС. Ёмкостная обратная связь на инвертирующий вход является

проблемой только для ОУ с токовой обратной связью (которые не рекомендуются использовать в качестве компараторов) и для ОУ с ООС по напряжению, которые не полностью скорректированы (т.е. неустойчивы при единичном коэффициенте передачи).

Обратная связь по «земляному» проводу устраняется правильной разводкой цепей заземления на плате. Это обсуждается в ряде документов компании Analog Devices, например, в руководствах по применению AN-202, AN-214, AN-280, AN-345 и AN-347. Дополнительную информацию о разводке аналоговых заземлений системы см. на сайте [2].

ГИСТЕРЕЗИС

Иногда не удаётся предотвратить неустойчивость с помощью вышеописанных мер. Остаётся только одна возможность – использовать небольшую управляемую положительную связь для обеспечения гистерезиса таким образом, чтобы в самом начале переходного процесса входной сигнал прошёл значительную часть обратного пути, прежде чем произойдёт изменение направления (см. рис. 12).

Гистерезис можно реализовать с помощью двух резисторов; величина гистерезиса пропорциональна их соотношению. Сигнал на компаратор может подаваться или на инвертирующий, или на неинвертирующий вход, но если сигнал подаётся на неинвертирующий вход, необходимо обеспечить достаточно низкий импеданс источника, чтобы он не слишком влиял на резистор R1. Разумеется, если импеданс источника достаточно предсказуем, он может быть использован в качестве резистора R1.

Если опорное напряжение находится посередине между двумя выходными напряжениями компаратора, как в случае симметричного питания и использования уровня «земли» в качестве опорного, то введение гистерезиса сдвигает положительный и отрицательный пороги переключения на равные расстояния от опорного напряжения. Но если опорный уровень ближе к одному напряжению питания, чем к другому, то пороги располагаются около опорного напряжения несимметрично.

В случае если опорный источник располагается не посередине между источниками питания, положительный порог переключения составляет $(R_2V_R +$

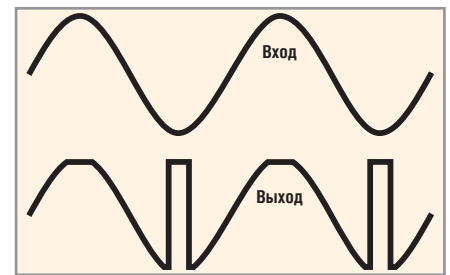


Рис. 10. Инверсия фазы у некоторых ОУ

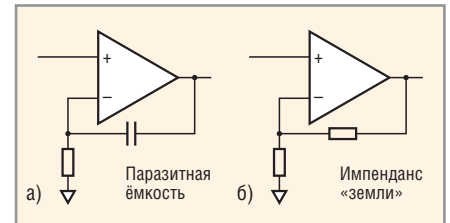


Рис. 11. Возникновение паразитной ОС

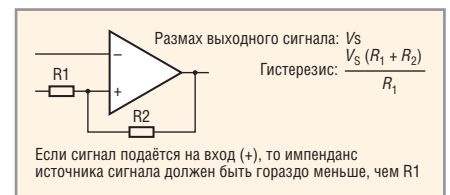


Рис. 12. Схема реализации гистерезиса

$+ R_1V_P)/(R_1 + R_2)$, а отрицательный – $(R_2V_R + R_1V_N)/(R_1 + R_2)$, где V_P и V_N – выходные напряжения компаратора, V_R – опорное напряжение компаратора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хотя ОУ не разработаны для применения в качестве компараторов, тем не менее, существуют многочисленные схемы применения, где использование ОУ в качестве компаратора является правильным инженерным решением. Важно принять грамотное решение, гарантирующее, что выбранный ОУ работает так, как ожидается.

Для этого требуется внимательное изучение технического описания и учёт влияния неидеальных параметров ОУ на данную схему. Так как ОУ используется в нестандартном режиме, Spice-модели могут не отражать его реальное поведение, и рекомендуется провести ряд экспериментов. Более того, поскольку не все приборы будут демонстрировать типичное поведение, при интерпретации результатов экспериментов гарантируется некоторый пессимизм.

ЛИТЕРАТУРА

1. James Bryant, Using Op Amps as Comparators. Analog Devices, Application Note AN-849, 2006.
2. <http://www.analog.com>.

